

高速分幅相机在强流脉冲电子束调试中的应用研究

江孝国 王远 代志勇 杨志勇 李洪 臧宗扬 谢宇彤 刘云龙 叶毅

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 高能强流脉冲电子束的束参数测量是加速器研制及调试中必不可少的一部分,它对测量设备的要求极高,必须具有高的时间分辨能力、较高的抗干扰能力及较高的灵敏度等性能。为了满足这种要求,研制了一种新的高性能超高速的三分幅相机。该分幅相机采用一种成像质量较好的会聚光成像的全口径分光原理,再结合高速的图像增强器、科学 CCD 相机及大规模集成电路等技术,使其具有了快门时间和幅间时间独立控制的能力,灵活的控制方式很好地满足了调试中的各种测试要求,并且在有效像面面积达到 $\Phi 25\text{ mm}$ 的情况下可以获得约 3 ns 的最高快门速度以及好于 35 lp/mm 的像面空间分辨率,圆满地完成了强流脉冲电子束的调试工作。

关键词 光学设计;分幅相机;门控型图像增强器;科学 CCD 相机;分光棱镜

中图分类号 O463.1;TB86 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.022201

Application of High Speed Framing Camera in Debugging of High Current and Pulsed Electron Beam

Jiang Xiaoguo Wang Yuan Dai Zhiyong Yang Zhiyong Li Hong

Zang Zongyang Xie Yutong Liu Yunlong Ye Yi

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The measurement of electron beam parameters is very important for a linear induction accelerator (LIA). The measurement equipments must meet the demands of high time resolution, high sensitivity and high stability. The ultra-high-speed performance is especially the most important one. One kind of 3-frame framing camera with ultra-high-speed and high performance has been developed recently. The optical principle of the framing camera is based on splitting the focused imaging light beam in the field of image space. It features good imaging quality and high light energy efficiency. The gated image intensifier with high speed shutter, the scientific CCD camera and the high speed controller based on large scale field programmable gate array are the main portions. The shutter time and the frame interval time can be set independently. The effective image size is 25 mm in diameter. The highest shutter time is about 3 ns. The spatial resolution is better than 35 lp/mm in image space.

Key words optical design; framing camera; gated image intensifier; scientific CCD camera; splitting prism

OCIS codes 220.3620; 040.1490; 080.2740; 110.4155; 320.7100

1 引言

对于直线感应加速器的调试而言,主要工作实际上是对产生的高能强流脉冲电子束束参数进行测量。由于加速器的精细调试要求,进行束流参数的时间分辨测量成为一个基本而重要的要求,时间分辨测量的重要性在于可以了解脉冲电子束的各种状态参数在其较短的脉冲时间内发生变化的过程,从而提高对电子束物理的认识,可以更精细地了解电子束性能,并为电子束的调控提供准确的数据,对电子束的精细调试具有很重要的意义。

高速摄影技术是目前唯一满足这种要求的测量技术。强流脉冲电子束的束参数测量技术的发展过程,也是一个实际需求与技术发展相结合的设备研制过程,其中最重要的就是高速分幅相机的研制及应用技术

收稿日期: 2013-08-02; 收到修改稿日期: 2013-09-16; 网络出版日期: 2014-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(10675104)

作者简介: 江孝国(1968—),男,硕士,研究员,主要从事强流加速器电子束参数时间分辨测量方面的研究。

E-mail: j_xg_caep@sina.com

的研究。由于光学机械式高速摄影设备(各种转镜式高速相机)的性能已达到极限,超高速的分幅相机采用了完全没有旋转部件的固定光学分光原理来提高摄影频率和获得良好的画质。目前,在超高速的分幅相机研制方面,在国际上比较有代表意义的是DRS公司的Ultra4、Ultra8、imacon 200系列及德国PCO公司的hsfc等,曝光时间达到10 ns甚至3 ns(可选配)的水平,幅面一般为 $\Phi 18$ mm,一次可以拍摄4、8、16等多幅图像。由于加速器的调试需要,中国工程物理研究院流体物理研究所研制了多种具有针对性的高速分幅测量系统,较好地解决了调试中电子束参数测量的各种问题;针对最新调试要求,在已研制成功的测量系统及设备的基础上^[1-2],通过完善系统结构及参数设计,进一步研制了一种超高速的高性能的三分幅相机。该分幅相机具有如下特点:1)各幅图像拍摄的快门时间宽度、图像幅间间隔时间的调节是独立的,具有灵活的控制组合方式;2)每幅图像的曝光时间最小可以低于3 ns;3)具有较好的线性响应、较高的动态范围;4)具有光纤输入输出接口,具有较高的抗干扰能力。本文将对其结构原理以及在加速器的调试中的应用研究进行详细的阐述。

2 光学系统原理及结构

采用了有限远成像光束分光原理,如图1所示。

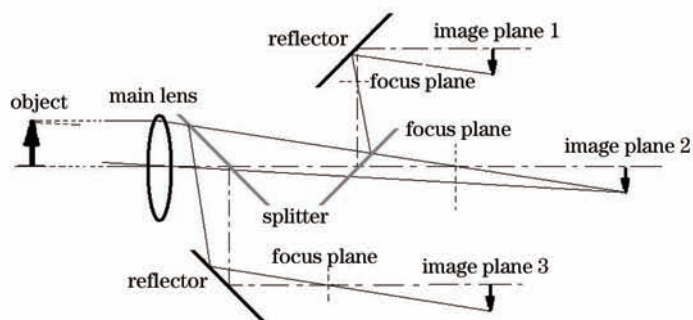


图1 分光原理

Fig.1 Light ray splitting principle

在图1所示的分光原理光路中,物体的成像光束在像空间用分光元件直接分光,然后再成像在各个像平面上,遵循几何光学的成像原理。这种分光原理简单,其特点是利用了全部的成像光线束,光能量利用率高,并且各成像光路在光学设计时可以较容易地进行独立校正,成像质量可以满足较高的要求,同时光学系统的数值孔径可以做得较大,具有较多的优势。这种光学系统的主要限制是镜头的焦距,由于在镜头后的像空间进行分光,因此要求其像空间的工作距离要比较大,对应的镜头焦距也要较大才行。

三分幅相机的系统结构及系统主要组成如图2所示。

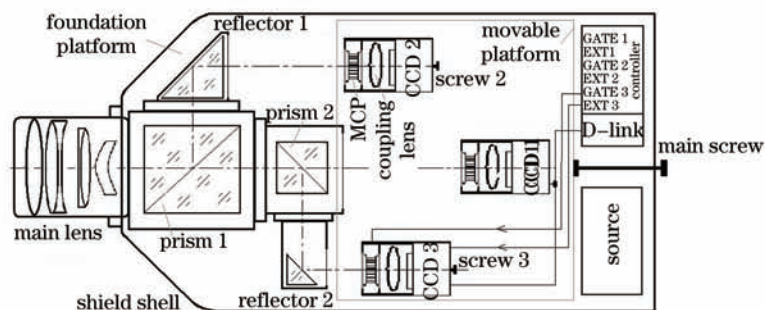


图2 分幅相机的系统结构

Fig.2 Structure of the framing camera

3 三分幅相机的主要光学性能

图3显示了三分幅相机的主要光学性能,包括调制传递函数(MTF)、像素的能量收集能力和成像畸变。该分幅相机的主物镜焦距为328 mm,口径为150 mm,为可更换式,同时配备有其他焦距的主物镜镜头。工

作的主要波段为 410 ~ 500 nm, 在其他范围也可以较好地工作。分幅相机光学系统的 MTF 在 20 lp/mm 时达到了 0.9 的较高水平, 和与其搭配的增强型电荷耦合器件 (ICCD) 相机像素的光能量收集能力达到了较好的配合, 可满足某些测量的特殊使用要求^[9]。当与 ICCD 相机配合使用时, 由于 ICCD 相机本身的空间分辨率相对较低, 将会大幅度地降低整个分幅相机系统的空间分辨率。

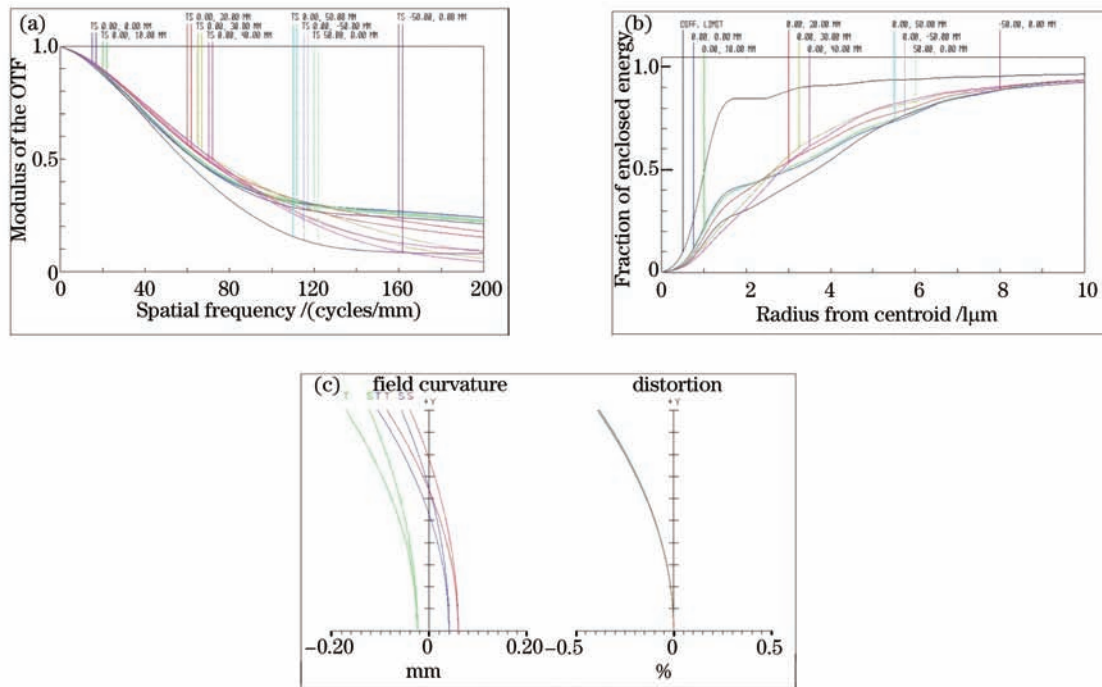


图3 主要光学性能。(a) MTF; (b)像素的能量收集能力; (c)畸变

Fig.3 Main optical performances. (a) MTF; (b) encircled energy; (c) distortion

4 三分幅相机的控制信号原理

三分幅相机正常工作需要两个控制信号: 系统的外触发同步信号 EXT 和图像增强器的门控触发信号 GATE。如图 4 所示, 触发信号 EXT 经控制单元产生三路同步的触发信号, 主要用于分幅相机中三台 CCD 相机的触发, 启动 CCD 相机工作, 并同时进入其光积分周期, 这是分幅相机工作的第一步。在 CCD 的光积分周期内 (一般设置为几毫秒即可满足大部分的实验要求, 也可根据多个实验事件的总间隔时间确定), 在正确的时刻输入门控触发信号 GATE, 启动数字延迟发生器、门宽控制信号发生器等工作, 并按照预先设置好的延迟时间 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 产生控制门控型图像增强器光电阴极导通的窄脉冲信号 τ_{e1} 、 τ_{e2} 、 τ_{e3} , 而 τ_{e1} 、 τ_{e2} 、 τ_{e3} 的宽度代表了相应各幅图像的曝光时间; 只要 τ_{e1} 、 τ_{e2} 、 τ_{e3} 产生的时间落在 CCD 光积分时间内并与正确的实验事件发生的时刻同步, 分幅相机就可以准确获得相关分幅图像的数据。图 4 中的 τ_0 是快门打开的固有延迟时间。由于延迟时间 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 及门宽时间 τ_{e1} 、 τ_{e2} 、 τ_{e3} 的设置是独立的, 因此, 分幅相机的各幅图像的控制也是独立的, 使其具有了非常灵活的组合控制方式, 在实际应用中获得了很好的效果。

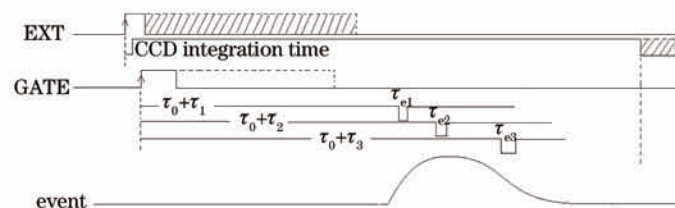


图4 分幅相机工作的控制流程图

Fig.4 Flow chart for the camera system control

5 三分幅相机的其他主要性能

5.1 曝光时间

这是分幅相机最重要的一个性能,它是衡量分幅相机工作速度的关键指标。研制的分幅相机控制器产生的快门控制信号典型波形如图5所示,图像幅间间隔时间为30 ns,对应的快门宽度分别为3、5、7和10 ns。

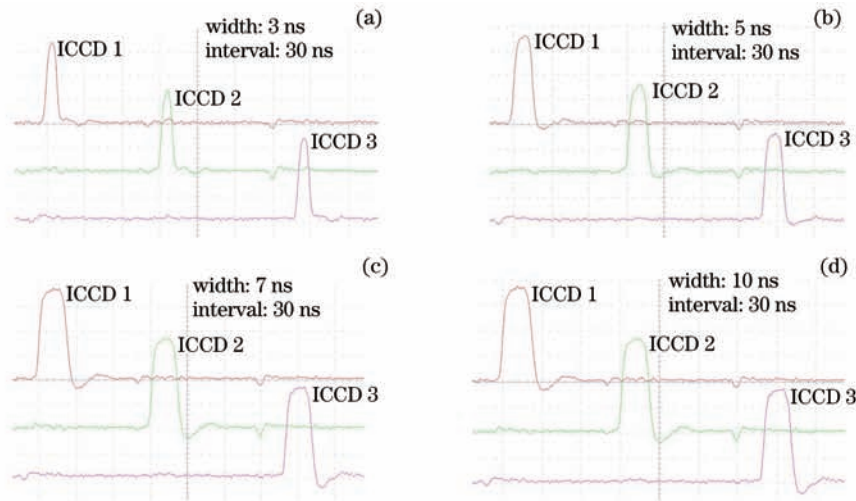


图5 分幅相机的典型曝光时间

Fig.5 Typical exposure time of the framing camera

表1是针对快门宽度设置为3 ns时各快门宽度的测量结果,其标准偏差均小于0.05 ns,说明稳定性较高;在其他各档位下的测量结果的标准偏差水平与此相当。

表1 分幅相机的曝光时间测量结果(单位: ns)

Table 1 Exposure time results of the framing camera (unit: ns)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mean	Standard deviation
CH1	2.957	2.939	2.959	2.918	2.947	2.933	2.947	2.976	2.951	2.961	2.949	0.016
CH2	3.073	3.022	3.006	3.002	3.031	3.068	3.006	3.034	3.044	3.008	3.029	0.026
CH3	3.038	3.032	3.027	3.027	3.052	3.068	3.019	3.037	3.022	3.046	3.037	0.015

实际上,当快门速度小于3 ns时,分幅相机仍然具有一定的拍摄能力,只是图像边沿与图像中心的灰度差别变大而已,线性关系变差,在定量研究时误差增大。

5.2 幅间间隔时间及摄影频率

由于数字延迟发生器的各通道工作是独立的,理论上的幅间间隔时间可以是任意的,因此可以是不等间距的,也可以是同步的(相当于各幅图像同时拍摄,在重要的实验时为了保证可靠,可以采用这种方式),取决于电路的工作主频、工作的步进及工作的控制模式。但由于曝光时间的限制,一般要求幅间间隔时间的设置值大于曝光时间。因此,最小曝光时间决定了其工作幅频,对应的摄影最高频率约为 3.3×10^8 frame/s。

5.3 空间分辨率

建立的分幅相机分辨率检测系统如图6所示。在主物镜的工作距离上($L=1.2$ m)放置4号标准分辨率板,并用闪光灯进行脉冲强光照,在曝光时间为3 ns的情况下对高速分幅相机的空间分辨率进行检测,所得各通道的典型分辨率图像如图7所示。第一通道可以较好地分辨到第14号线对(线宽为37.8 μm),通过换算,等效到像面上的第一通道的空间分辨率达到35 lp/mm,第二通道的空间分辨率达到31.4 lp/mm(分辨12号线对),第三通道的空间分辨率达到33.2 lp/mm(分辨13号线对)。

5.4 噪声水平

在暗光的环境、CCD工作温度设定在 -10 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下,选取图像中心点位置的像素完成了分幅相机各通道的噪声测量,并采用其50次暗本底灰度的标准偏差值作为其噪声值。表2是典型的噪声测量值示意,各通道的噪声约在10个电子的水平。因此,分幅相机的等效背景照度也是很低的,适合光信号很弱的图像

的拍摄。

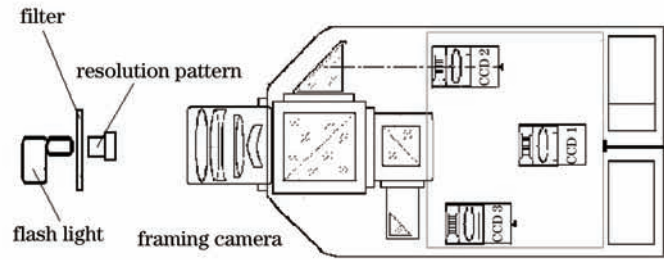


图6 分幅相机的空间分辨率测量装置

Fig.6 Setup of spatial resolution measurement of the framing camera

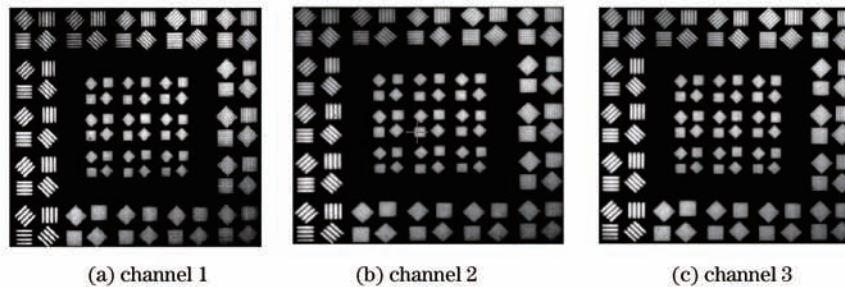


图7 分幅相机的空间分辨率测量图像结果

Fig.7 Image results of spatial resolution of the framing camera

表2 分幅相机各通道典型噪声

Table 2 Typical noise of the framing camera

Channel No.	Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Pixel position	Dark background / electron	Standard deviation / electron	Equivalent noise / electron
CH1	-10	(512, 512)	310.9	2.3	9.2
CH2	-10	(512, 512)	305.8	2.8	11.2
CH3	-10	(512, 512)	307.9	2.6	10.4

5.5 快门开启同步监测功能

本三分幅相机的一个特点是提供了快门开启时刻的同步监测功能,该功能可以精确地测量分幅相机快门实际打开的时刻,使用户可以精确地知道拍摄时刻与事件间的时间关系,同步监测的精度高于1 ns,对于研究目的有重要意义^[4]。即使在强干扰环境里使用受到了一定的干扰,至少可以知道具体的拍摄时刻,因此仍然具有重要意义。图8是快门开启监测系统的一个原理示意图,它主要将施加在微通道板(MCP)上的门控信号进行微分,得到对应门控信号前后沿的一负一正的两个尖脉冲信号,其中负尖脉冲信号对应快门开启的时刻。图中的缓冲器起到隔离功能电路对微分电路的影响的作用,而功能电路包括两大处理功能,首

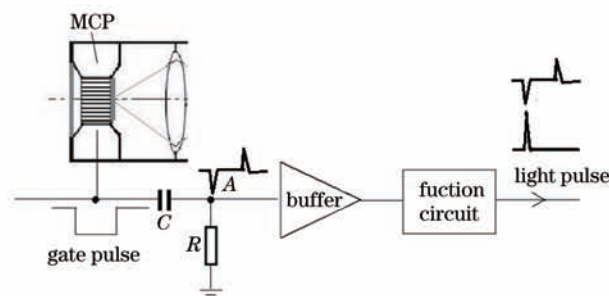


图8 快门监测原理示意图

Fig.8 Shutter opening monitor system

先是仅对负尖脉冲进行电信号的相关处理,其次,针对负尖脉冲进行高速的电光转换,将负尖脉冲转换为一个光脉冲信号再通过光纤输出去以便在远端进行监测,这样可以提高监测系统的抗干扰能力及避免长电缆对信号的影响。测量图8中A点波形及光脉冲间的延迟时间(扣除光纤延迟及光脉冲测量系统的固有延迟时间)就可以知道快门开启的时刻。测量结果显示,延迟时间的抖动小于1 ns,表明快门监测系统的同步精度达到了1 ns的水平。

6 应用研究

分幅相机在获得应用前,解决了精密的同步触发、电磁屏蔽及抗X光辐射等重要问题,最终比较稳定地捕获到图像信号。图9是三分幅相机在加速器强流脉冲电子束调试中进行时间分辨的电子束束斑测量的布局图,电子束脉冲宽度约70 ns,调试中需要使用较高的快门速度了解脉冲前沿、中部平顶区及后沿的瞬态性能。图10是一次调试实验中针对电子束脉冲前沿、中部及后沿采用5 ns快门宽度拍摄的电子束脉冲的剖面变化情况(各图的比例相同),可以清晰地了解到运输磁场的配置对电子束各个时刻的影响规律。

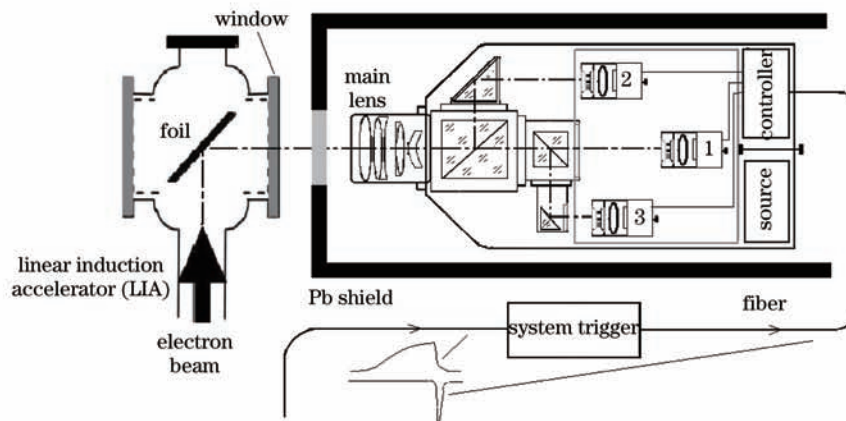


图9 电子束调试布局图

Fig.9 Layout of debugging for electronic beam

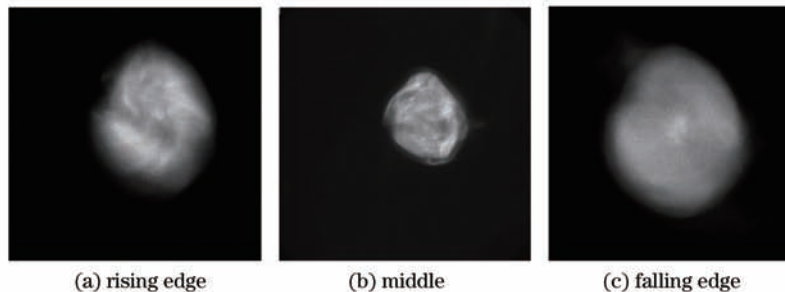


图10 以5 ns的快门速度获得的电子束脉冲的瞬态图像

Fig.10 Instantaneous images of the pulsed electron beam captured with 5 ns shutter time

图11是为了研究电子束脉冲前后沿对整个束脉冲剖面分布的影响而设计的实验获得的结果,其中图11(a)是束脉冲中间时刻5 ns的图像,显得比较均匀,而加入了束前、后沿后的图像反而显得不均匀,并且中心存在较小的亮斑,如图11(b)所示,这正是电子束前后沿能量不同造成的影响。图像显示的细节是以往的高速分幅相机不能获得的^[9],充分说明了其具有的高性能。

利用该高速分幅相机还对电子束在聚焦过程中、聚焦后反弹崩溃的演变过程进行了大量的研究,获得了较多新的认识和丰富的调试经验。图12是经过大量调试后获得的分布比较好的束斑图像,直径约15 mm,快门速度5 ns。

7 结 论

已完成研制的超高速高性能的三分幅相机,采用了全口径的有限远成像的光束分光原理,具有成像质

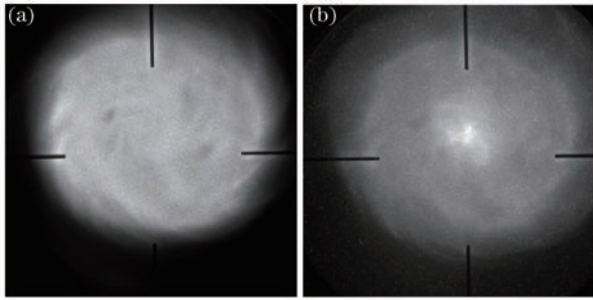


图 11 束脉冲前后沿的影响。(a)束脉冲中间时刻;(b)加入束前、后沿

Fig.11 Effect of the leading or following edge of the beam. (a) Middle stage of the pulse; (b) with the leading and falling edges added

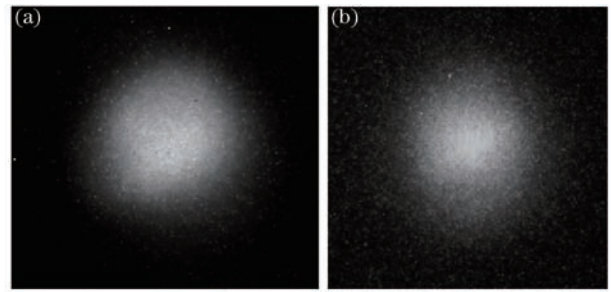


图 12 良好的电子束束斑

Fig.12 Good electron beam images

量好、效率高的特点,使分幅相机获得了好于 35 lp/mm 的空间分辨率。较高的灵敏度和较低的噪声水平使分幅相机具有了较好的弱光拍摄能力;高达 3 ns 的曝光时间使其具有了在超高速分幅摄影领域内获得广泛应用的能力;采用先进的大规模可编程集成电路不仅提高了控制系统的集成度,而且使分幅相机具有曝光时间、幅间间隔时间可以进行独立设置的能力,满足了目前各种复杂的应用控制要求,并在实际中获得了成功的应用,达到了超高速高性能分幅相机研制的目的。

参考文献

- 1 Jiang Xiaoguo, Wang Yuan, Zhang Kaizhi, *et al.*. The development of high speed two frame gated camera for parameters measurement of Dragon I LIA [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(5): 1146-1150
江孝国, 王 远, 张开志, 等. 用于神龙一号参数测量的高速两分幅相机研制[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(5): 1146-1150.
- 2 Shan Baozhong, Guo Baoping, Niu Hanben. Multi-channel nano-second framing camera with gate selection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(12): 1963-1968.
单宝忠, 郭宝平, 牛憨笨. 多通道门选通纳秒分幅相机[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(12): 1963-1968.
- 3 Jiang Xiaoguo, Dong Xiaona, Wang Yuan, *et al.*. Design of the instantaneous measurement system based on optical transition radiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(9): 2147-2150.
江孝国, 董晓娜, 王 远, 等. 瞬态光学渡越辐射测量系统的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(9): 2147-2150.
- 4 Jiang Xiaoguo, Li Chenggang, Wang Yuan, *et al.*. Accurate burst trigger mode for dragon-I electron beam measurement system [J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2006, 30(8): 784-787.
江孝国, 李成刚, 王 远, 等. 神龙一号电子束束参数测量系统猝发式的精密触发方式研究[J]. *高能物理与核物理*, 2006, 30(8): 784-787.
- 5 Jiang Xiaoguo, Guo Baoping, Deng Jianjun, *et al.*. High speed multi-frame gated camera for electron beam parameters measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(5): 99-103.
江孝国, 郭宝平, 邓建军, 等. 用于电子束参数测量的高速分幅相机[J]. *光电工程*, 2006, 33(5): 99-103.